

文章编号: 1001—4322(2001)02—0137—05

SiO₂ 半波覆盖层对 HfO₂/SiO₂ 高反射膜激光损伤的影响*

胡建平, 邱服民, 付雄鹰, 曾 勋

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘 要: 研究了 SiO₂ 半波覆盖层对 HfO₂/SiO₂ 高反射膜 1064nm 激光损伤的影响, 分析薄膜的激光损伤特性及图貌得出, 对于单脉冲(1-ON-1)激光损伤, SiO₂ 半波覆盖层能提高 HfO₂/SiO₂ 高反射膜的激光损伤阈值; 可显著降低激光损伤程度, 减小灾难性损伤发生的概率; 可大幅度提高 HfO₂/SiO₂ 高反射膜的抗激光损伤能力。

关键词: SiO₂ 半波覆盖层; 激光损伤阈值; 损伤图貌; 高反射膜

中图分类号: TN 244; TN 246 **文献标识码:** A

在 Nd: YAG 高功率大能量激光装置中, 光学薄膜的激光损伤阈值一直是其技术发展的瓶颈之一。1064nm 高反射膜是激光器中光学薄膜的重要部分, 因而提高高反射膜抗激光损伤能力, 一直是激光薄膜工作者努力的目标。

提高 1064nm 高反射膜的抗激光损伤能力, 主要与薄膜的镀制工艺、镀膜材料的选取、膜系设计等因素有关^[1-3]。目前, 镀制高损伤阈值的 1064nm 高反射膜一般选用 HfO₂ 膜料作为高折射率材料, SiO₂ 膜料作为低折射率材料^[4], 并在高反射膜最外层加镀光学厚度为激光波长 1064nm 一半的 SiO₂ 薄膜覆盖层, 这样可显著提高 HfO₂/SiO₂ 薄膜的抗激光损伤能力^[5-7]。本文针对成都精密光学工程研究中心镀制的 HfO₂/SiO₂ 高反射薄膜, 分别对加镀 SiO₂ 半波覆盖层和没有加镀 SiO₂ 半波覆盖层的高反射膜进行激光损伤实验研究。

1 实验装置与样品

HfO₂/SiO₂ 高反射膜由德国莱宝公司的 APS1504 镀膜机, 采用电子蒸发反应镀膜, 在 Φ40 的 K9 玻璃基片上镀制而成, 膜系设计为 A/H(LH)¹²/G 和 A/2LH(LH)¹²/G, 前者没有镀 SiO₂ 半波覆盖层, 记为 HR, 后者镀制 SiO₂ 半波覆盖层, 记为 HRO, 薄膜中心反射波波长 λ=1064nm, 镀膜本底真空度为 p₀=5×10⁻⁴Pa, 镀膜沉积速率 0.4nm/s 左右, 镀膜所用基片的表面均方根粗糙度(m.s)均小于 0.8nm。

光学薄膜激光损伤实验装置主要由单纵膜 Nd: YAG 激光器、光束传输部分、焦距 3.5m 的聚焦透镜、EM 500 能量计及小样品平台组成。在薄膜的激光损伤实验中, 采用脉宽 10ns、波长 1064nm 的激光脉冲, 激光光束经焦距 3.5m 的透镜聚焦后, 形成直径 1.2mm 的焦斑, 薄膜样品放置在激光焦斑处, 与入射激光的夹角小于 5°。损伤实验时, 样品先用化学纯酒精或丙酮清洗, 直至清洗干净, 薄膜样品损伤实验采用 1-ON-1 和 N-ON-1 两种方式。为了消除激光预处理效应, 相邻激光照射点之间的间距为 3mm, 薄膜激光损伤由 100X~200X 的 Nomaski 显微镜按国际标准分析及判定^[8]。

2 结果与分析

2.1 损伤图貌

对于 1064nm, 10ns 的激光脉冲, HfO₂/SiO₂ 薄膜 HR 和 HRO 受激光辐射后, 激光损伤过程均表现为薄膜表面激光损伤点形成等离子体闪光, 在 100X~200X 的 Nomaski 显微镜下观察, 可以发现, 在损

* 收稿日期: 2000-09-18; 修订日期: 2000-11-29

基金项目: 国家 863 惯性约束聚变领域基金(863-416-2-4 15); 中国工程物理研究院院科研基金(990225)

作者简介: 胡建平(1964-), 男, 湖北人, 副研, 硕士, 从事激光损伤研究; 成都 450 信箱。

伤实验中形成等离子体火花, 薄膜表面的损伤形式均有疤痕存在, 其典型损伤由等离子体烧蚀喷溅形成(如图 1(a)、(b)所示), 从图中可以看出, HR 和 HRO 薄膜所形成的疤痕有明显不同, HR 薄膜所形成的疤痕烧蚀效应明显, 疤痕的结构如图 1(c)所示, 为蜂窝状的沙粒结构, 散射较大, 而 HRO 的损伤多为激光辐照区域多个不连接疤痕型, 这是由于 SiO_2 较好的物理化学性能, 减轻了激光辐射区域缺陷所形成等离子体烧蚀效应, 另外, HRO 薄膜所形成的疤痕表面光滑, 没有蜂窝状沙粒出现, 散射小, He-Ne 散射光几乎没有变化, 可以看出, 损伤的散射不明显。

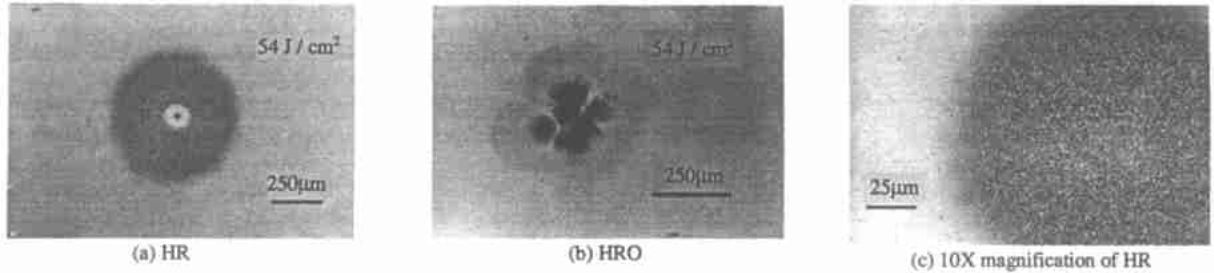


Fig 1 Typical laser damage morphologies of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflecting coating

图 1 高反射膜的典型损伤图貌

HR 和 HRO 薄膜在损伤阈值附近(低能量密度下)的典型损伤图貌如图 2(a)、(b)所示, 对于 HR 和 HRO 薄膜来说, 表现为形成小的损伤疤痕, 疤痕中间为一针孔, 从图形结构上看, 明显为 HfO_2 节瘤缺陷吸收激光能量后, 形成等离子体喷溅, 从而形成针孔。HR 薄膜的针孔损伤是由最外层中的 HfO_2 节瘤缺陷引起, 由于激光能流密度在损伤阈值附近, 故损伤疤痕小且单一, 结构也为蜂窝沙粒状, 激光散射较大; 而 HRO 薄膜, 由于最外层有 SiO_2 半波覆盖层, 其所形成的针孔要小, 且针孔周围疤痕表面光滑, 只是颜色改变, 表面 SiO_2 半波覆盖层也看不出损伤迹象, 激光散射几乎不变。

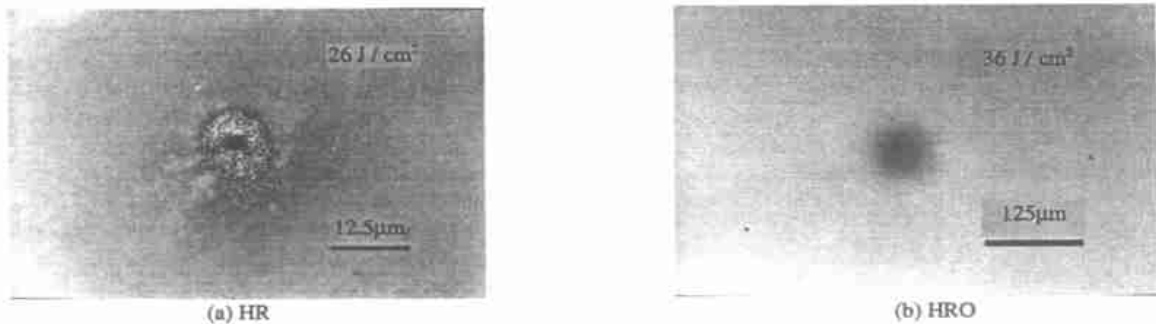


Fig 2 Laser onset damage morphologies of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflecting coating

图 2 高反射膜激光初始损伤图貌

本次实验中, 对于 10ns 的 1064nm 激光脉冲, HR 和 HRO 薄膜的单次激光(1-ON-1)损伤形态均表现为疤痕, 没有纯粹的针孔, 也没发现层裂, 只是疤痕大小不同, 这说明对 10ns 的 1064nm 激光, $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反射膜激光损伤机制主要为热损伤, 即薄膜缺陷。它是 HfO_2 微小节瘤颗粒吸收激光能量, 温度迅速升高形成高温等离子体喷溅, 并烧蚀周围薄膜形成疤痕。由于 SiO_2 材料物理化学性能好, 节瘤颗粒吸收激光能量融化后大部分被 SiO_2 半波覆盖层阻隔, 只在膜层之间形成疤痕, 因而 HRO 薄膜损伤疤痕光滑, 激光散射小。

SiO_2 半波覆盖层不仅能提高 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜的初始损伤能流密度(即绝对损伤阈值), 而且能显著提高 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜抗激光进一步损伤的能力。对于薄膜单点不连续多次(N-ON-1)激光损伤, HR 薄膜由于单次激光脉冲所形成的损伤疤痕为蜂窝沙粒状结构, 散射吸收大, 因而后续激光脉冲较易进一步损伤疤痕, 造成灾难性损伤, 如层裂, 如图 3(a)、(b)、(c)所示。而 HRO 薄膜, 由于其单次激光损伤疤痕表面光滑, 散射小, 使后续激光脉冲进一步损伤薄膜的概率比 HR 薄膜大为降低。

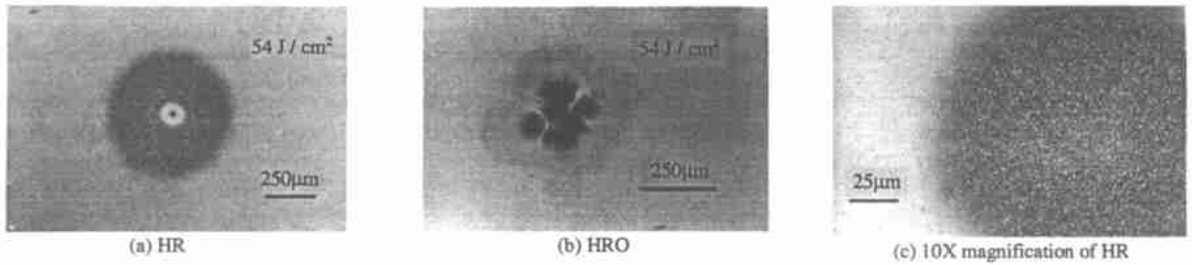


Fig 3 Laser damage morphologies of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflecting coating by multi-shot

图 3 多脉冲激光作用下的HR 高反射膜损伤图貌

对于薄膜单点单次(1-ON-1)激光损伤,当能量密度较大时,薄膜表面可被汽化掉一部分,如图 4 所示,可以看出,未加 SiO_2 半波覆盖层的 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反射膜,其表面损伤要严重得多。

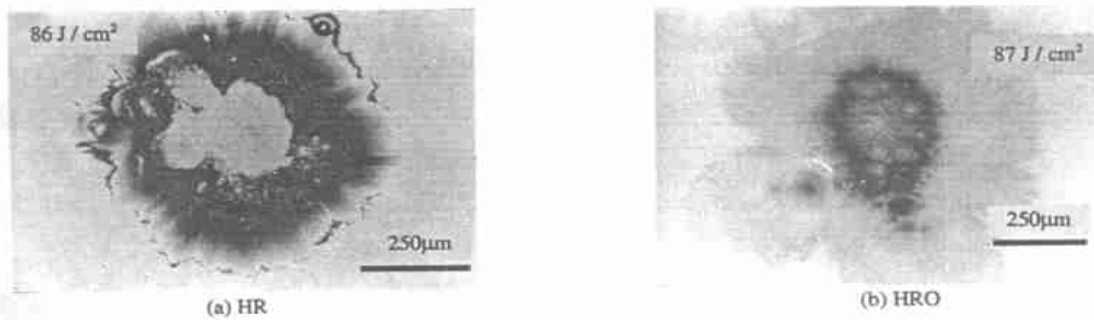


Fig 4 High-energy density laser damage morphologies of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflecting coating

图 4 高反射膜的大能量密度激光的损伤图貌

2 2 实验数据及分析

HR 和 HRO 薄膜损伤阈值及损伤概率分布如图 5 所示,按国际标准^[8]确定损伤阈值(即零概率损伤阈值),HRO 薄膜的激光损伤阈值为 $32\text{J}/\text{cm}^2$,HR 薄膜为 $22\text{J}/\text{cm}^2$,可以看出, SiO_2 半波覆盖层提高 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反射膜的损伤阈值达 50% 左右。由于 SiO_2 薄膜的损伤阈值远大于 HfO_2 ,因而对于 HR 和 HRO 薄膜的初始激光损伤来说,主要是由最外层的 HfO_2 薄膜中的节瘤缺陷造成。

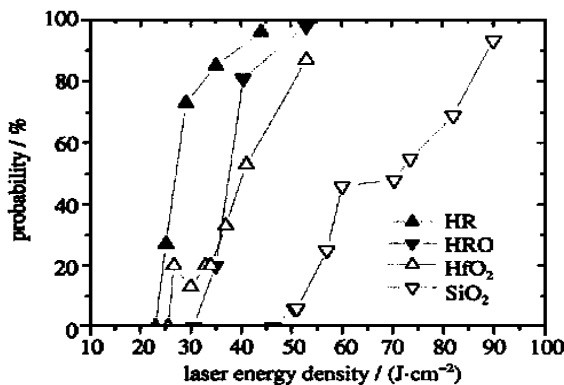


Fig 5 Damage probability of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ (HR or HRO),

$\lambda/2$ silica and hafnia single layer coating

图 5 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反射膜(HR or HRO),

SiO_2 和 HfO_2 单层膜的激光损伤概率

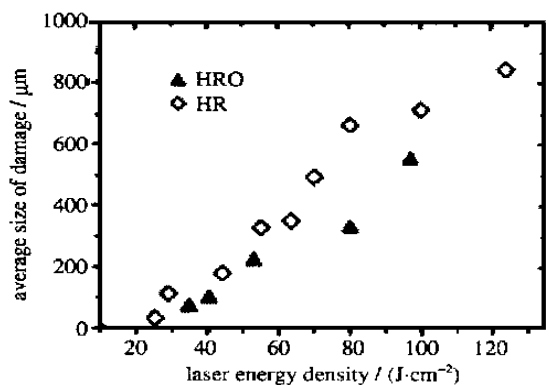


Fig 6 Damage site diameter vs Q-sw itched 10ns

pulse laser energy density on axis

图 6 损伤尺寸与 10ns 激光脉冲能量密度关系曲线

薄膜的激光损伤程度有轻有重,轻微的激光损伤所形成的激光创面小且光滑,一般是薄膜表层轻微损伤;而灾难性激光损伤,创面大而粗糙,图 6 为 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜在直径 1mm 左右光斑照射下的损伤尺寸与激光能流密度的关系。从损伤尺寸来看,加 SiO_2 半波覆盖层的高反射膜,其损伤程度要比未加 SiO_2

半波覆盖层的高反射膜明显降低。

对于薄膜的损伤特性而言,激光脉冲的不连续多次损伤特性(N-ON-1)是其抗激光损伤能力的一个重要方面。在本次实验条件下,我们发现,等离子体闪光与薄膜损伤密切相连,因此用一定数量激光脉冲照射下等离子体闪光数来表征薄膜的进一步损伤情况。图7为10次不连续激光脉冲辐射同一点时,等离子体闪光数与激光能流密度的关系(每一能量做10次,数值取平均)。从图中可知,薄膜在2次打击后不再损伤,则后续激光脉冲一般不会造成薄膜进一步损伤,若第3次和4次脉冲出现激光损伤,则后续脉冲均会造成薄膜进一步损伤(即后续每一脉冲均会造成薄膜出现等离子体闪光);另外还可看出,SD₂半波覆盖层可显著降低薄膜在一定能流密度下进一步损伤的几率,提高薄膜抗激光脉冲多次击打能力。因此,SD₂半波覆盖层不仅能提高薄膜的激光损伤阈值,也可防止在多次不连续激光脉冲打击下薄膜初始损伤(如小疤痕发生崩溃性损伤),即能显著提高薄膜的功能性损伤阈值。

3 结 论

通过对加和不加SD₂半波覆盖层的HfO₂/SD₂高反射膜的激光损伤实验数据,特性及图貌的详细分析,可以得出以下几点结论:(1)对于单次激光损伤,HR薄膜损伤表面粗糙,为蜂窝沙粒状结构,散射较大,而HRO薄膜损伤表面光滑均匀,散射小。(2)对于薄膜在损伤阈值附近的初始单次激光损伤,主要是由最外层HfO₂薄膜中的颗粒节瘤引起,形成带针孔的小疤痕,一般来说,HRO薄膜的针孔及疤痕要比HR薄膜小,损伤阈值也提高至1.5倍,说明SD₂半波覆盖层能提高HfO₂/SD₂薄膜的激光损伤阈值。(3)由HR和HRO薄膜损伤点大小与能流密度的关系可知,SD₂半波覆盖层可显著减轻损伤程度,降低灾难性损伤发生的几率。(4)对于不连续多次激光脉冲,SD₂半波覆盖层能显著降低薄膜进一步发生灾难性损伤的几率,提高薄膜抗激光进一步损伤的能力。

参考文献:

- [1] Fournet C, Pinot B, Geenen B, et al High damage threshold mirrors and polarizers in the ZrO₂/SD₂ and HfO₂/SD₂ dielectrics systems[A]. *Proc SPIE* [C], 1991, **1624**: 282-293
- [2] Genin F Y, Stolz C J, Kozłowski M R. Growth of laser-induced damage during repetitive illumination of HfO₂/SD₂ multilayer mirror and polarizer coatings[R]. UCRL-JC-124877, 1997.
- [3] 胡建平, 马 孜, 李 伟, 等 氧化物薄膜抗 1064nm 脉冲激光损伤的特性研究[J]. *光学学报* 2000, **20**(2): 262-266
[Hu J P, Ma Z, Li W, et al 1064nm pulse laser damage of oxide coatings *ACTA OPTICA SINICA*, 2000, **20**(2): 262-266] (in Chinese)
- [4] Bliss E S, Milan D, Bradbury R A. Dielectric mirror damage by laser radiation over a range of pulse durations and beam radii[J]. *Appl Opt* 1973, **12**(4): 677-689.
- [5] Stolz C J, Genin F Y, et al Effect of SD₂ Overcoat thickness on laser damage morphology of HfO₂/SD₂ Brewster's angle polarizers at 1064nm [R]. UCRL-JC-124875, 1997.
- [6] Genin F Y, Stolz C J, Reitter T, et al Effect of electric field distribution on the morphologies of laser induced in hafnia-silica multilayer polarizer[R]. UCRL-JC-124873, 1997.
- [7] 付雄鹰, 孔明东, 胡建平. 波开 1064nm 脉冲激光高阈值反射膜的研制[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(4): 413-417.
[Fu X Y, Kong M D, Hu J P. The deposition of HR coating with high damage threshold for 1064nm laser. *High power laser and particle beams*, 1999, **11**(4): 413-417] (in Chinese)
- [8] Draft International Standard ISO/DIS 11254, Optics and Optical Instruments-Laser and Laser related equipment Test methods for laser induced damage threshold of optical surface[S].

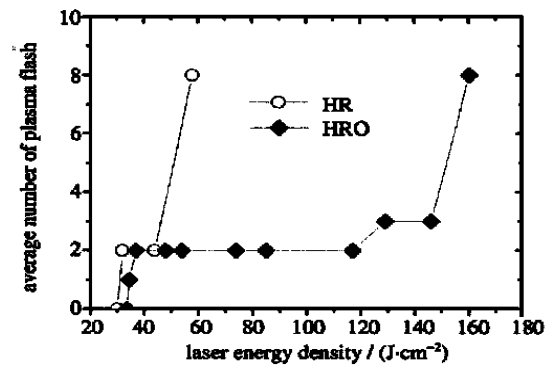


Fig. 7 Plasma flash number in 10 pulse shots on certain site at certain energy density

图7 10次不连续激光脉冲照射下薄膜等离子体闪光数

Effect of $\lambda/2$ silica overcoat on laser damage of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflecting coating

HU Jian-ping, QU Fu-min, FU Xiong-ying, ZENG Xun

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, P. O. Box 450, Chengdu 610041, China)

Abstract The laser damage of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflecting coating with and without $\lambda/2$ silica overcoat was studied in detail respectively, the damage threshold and possibility was measured by using a 1064nm longitude mode, 10ns Nd:YAG laser, the laser damage size and morphology were observed and analyzed by using a Nomaski microscope, main conclusions are as follows: (1) The $\lambda/2$ silica overcoat does affect laser damage threshold of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflecting coating significantly, and increase the laser damage threshold of coating up to 1.5 times; (2) According to laser damage morphologies, $\lambda/2$ silica overcoat can reduce the serious damage of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflecting coating, and prevent catastrophic damage of the hafnia top layer; (3) For multi-shot laser, $\lambda/2$ silica overcoat can greatly improve the stability of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflector against the laser pulses after the first shot

Key words $\lambda/2$ silica overcoat; laser damage morphology; damage threshold; high reflecting coating